

IRRIGAÇÃO POR SULCOS

Patricia Angélica Alves Marques
ESALQ/USP

Prof Patricia A A Marques LEB1571 Irrigação ESALQ 2023



1. DEFINIÇÃO

A irrigação por sulcos é um método que consiste na distribuição de água através de pequenos canais (os sulcos), paralelos às fileiras de plantas.

Considera-se que:

O tempo em que a água escoar e infiltra deve ser suficiente para umedecer a zona do perfil do solo onde estão as raízes da espécie cultivada.



2. CARACTERÍSTICAS DO MÉTODO

- Utilizado para irrigar espécies plantadas em linha;
- Não molha toda a superfície do solo (30 - 80%) → reduz as perdas por evaporação;
- Necessita mais mão de obra por unidade de área que outros métodos;

2. CARACTERÍSTICAS DO MÉTODO

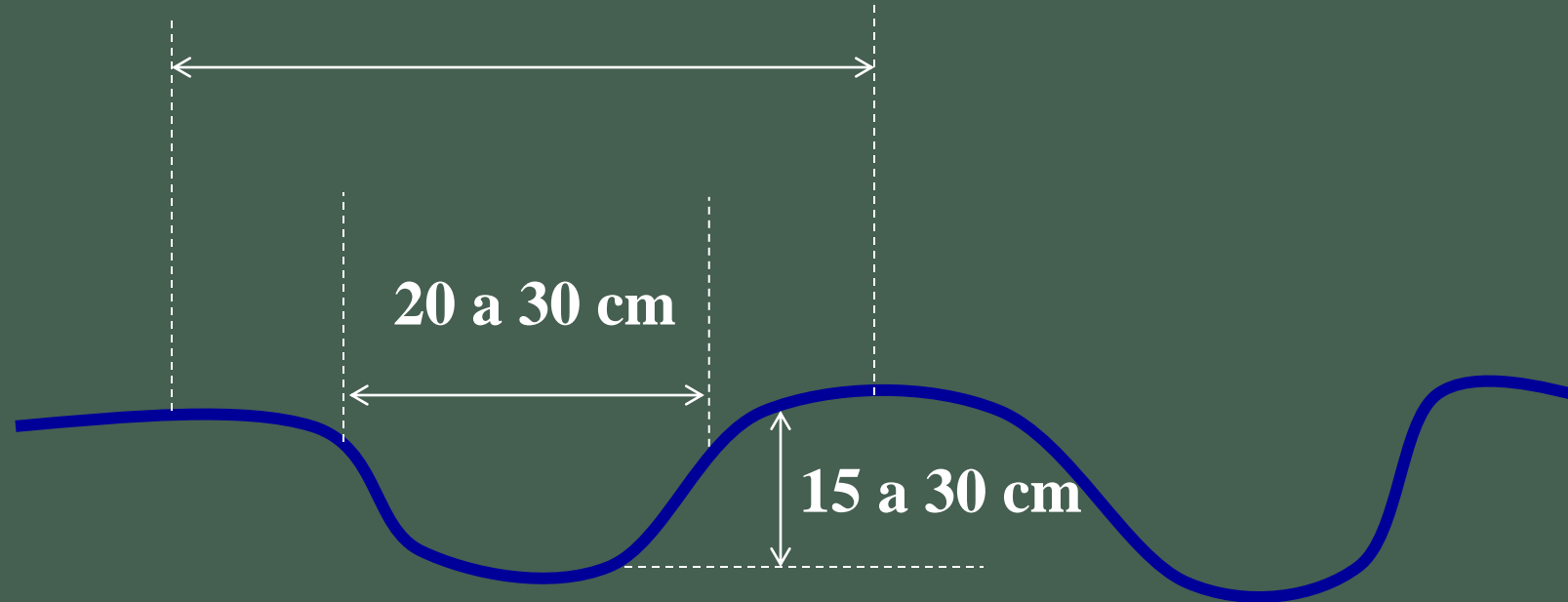
- Experiência dos irrigantes para derivar água do canal aos sulcos e para controlar a vazão durante a irrigação;
- Requer pequenas declividades e relevo da superfície uniforme;
- Se o terreno não exigir sistematização, é o método de menor custo (US\$ 400 a 800/ha);

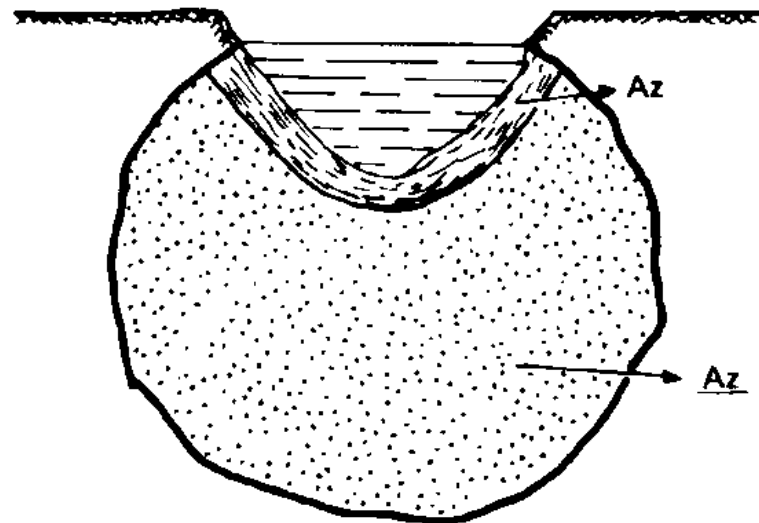
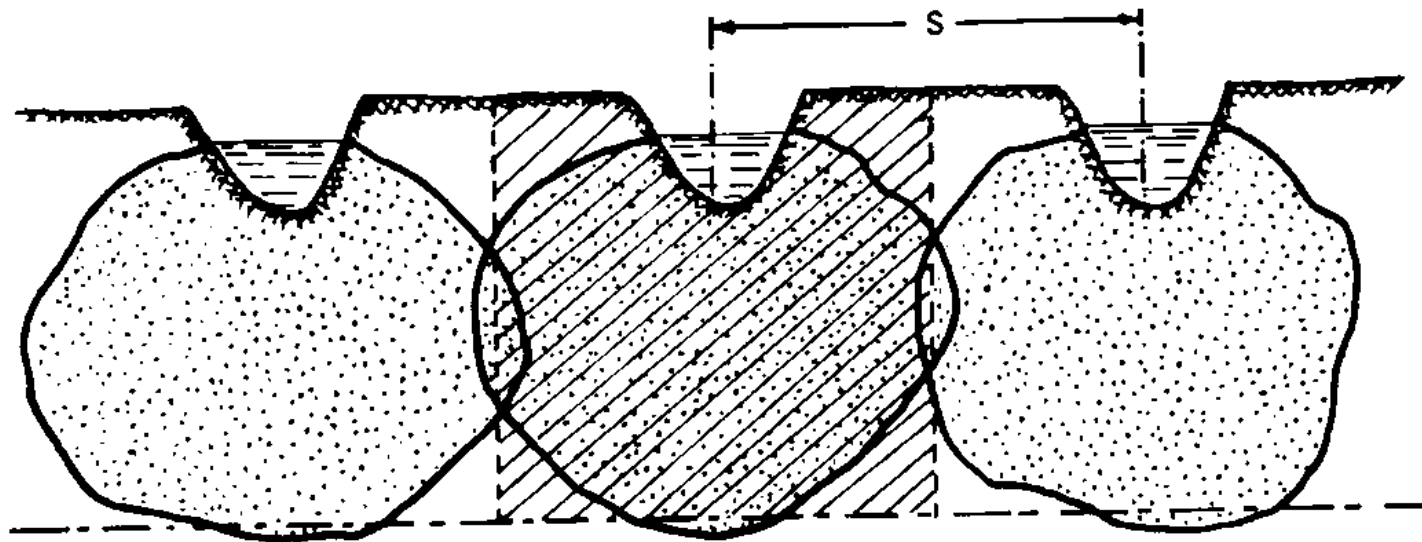
2. CARACTERÍSTICAS DO MÉTODO

- O solo deve ser homogêneo ao longo do comprimento do sulco (textura);
- Necessita grandes vazões para evitar desuniformidade na lâmina de irrigação aplicada ao longo do sulco;
- Não exige água limpa;
- Não é afetado pelo vento;

3. FORMA DO SULCO: DIMENSÕES E ESPAÇAMENTO

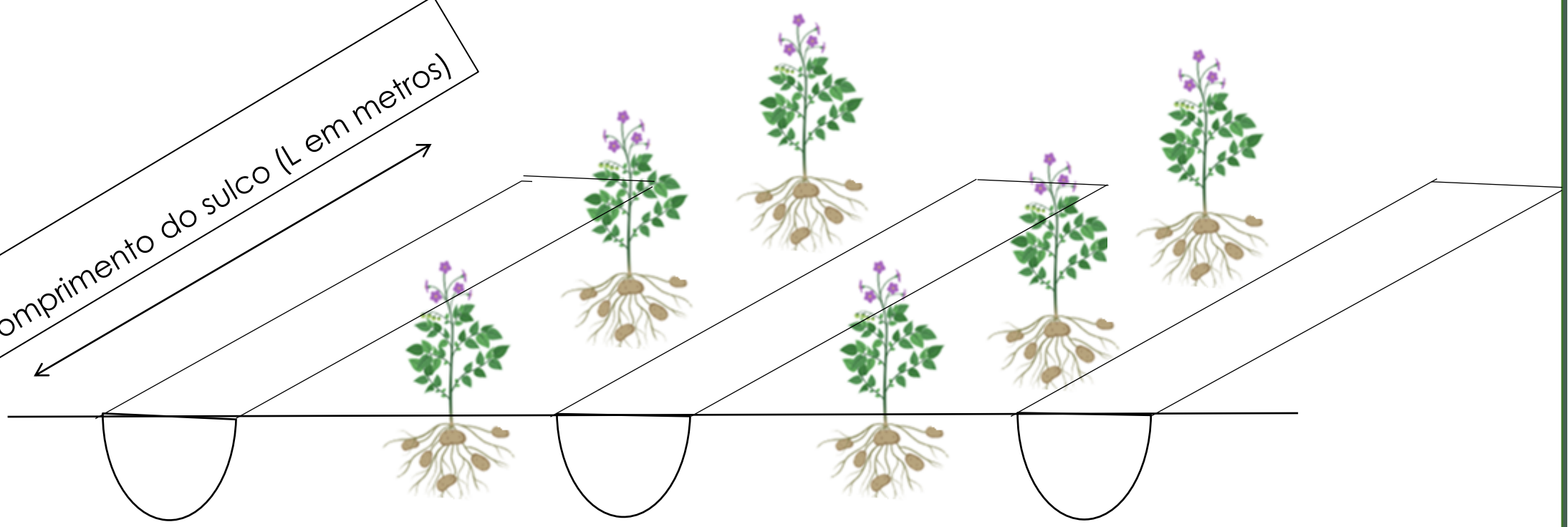
75 a 100 cm é função do espaçamento entre linhas,
tipo de solo e maquinário



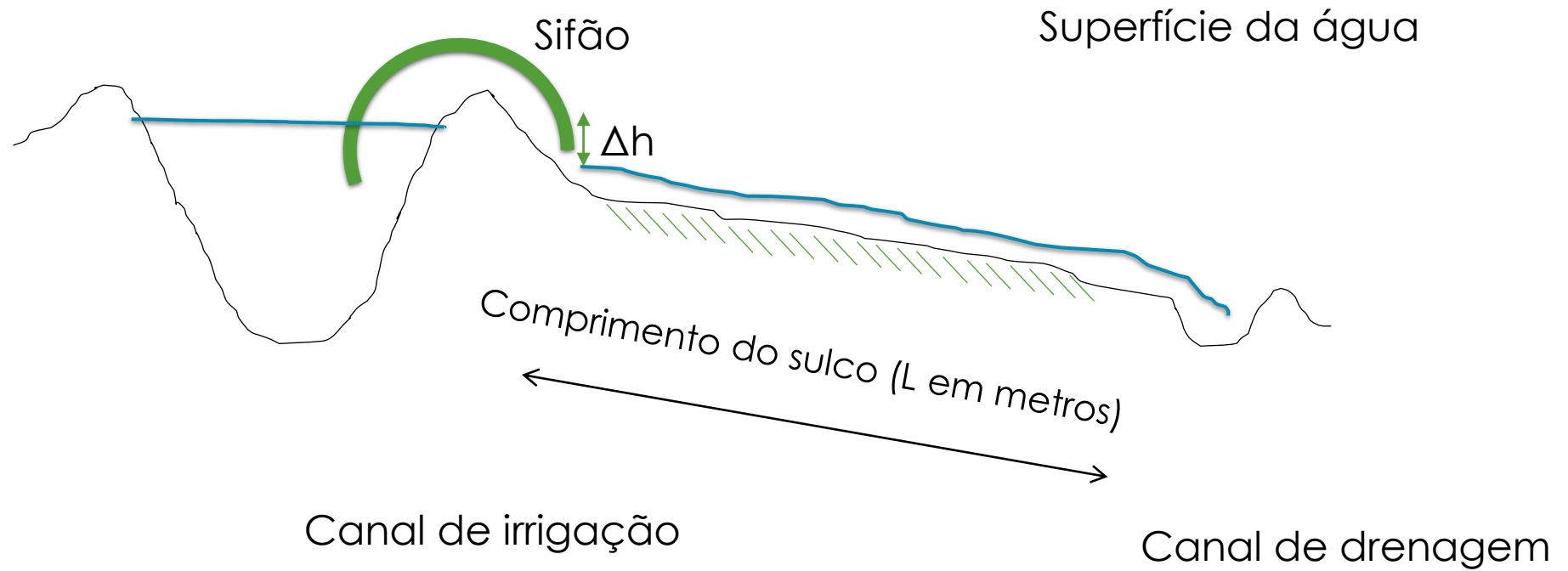


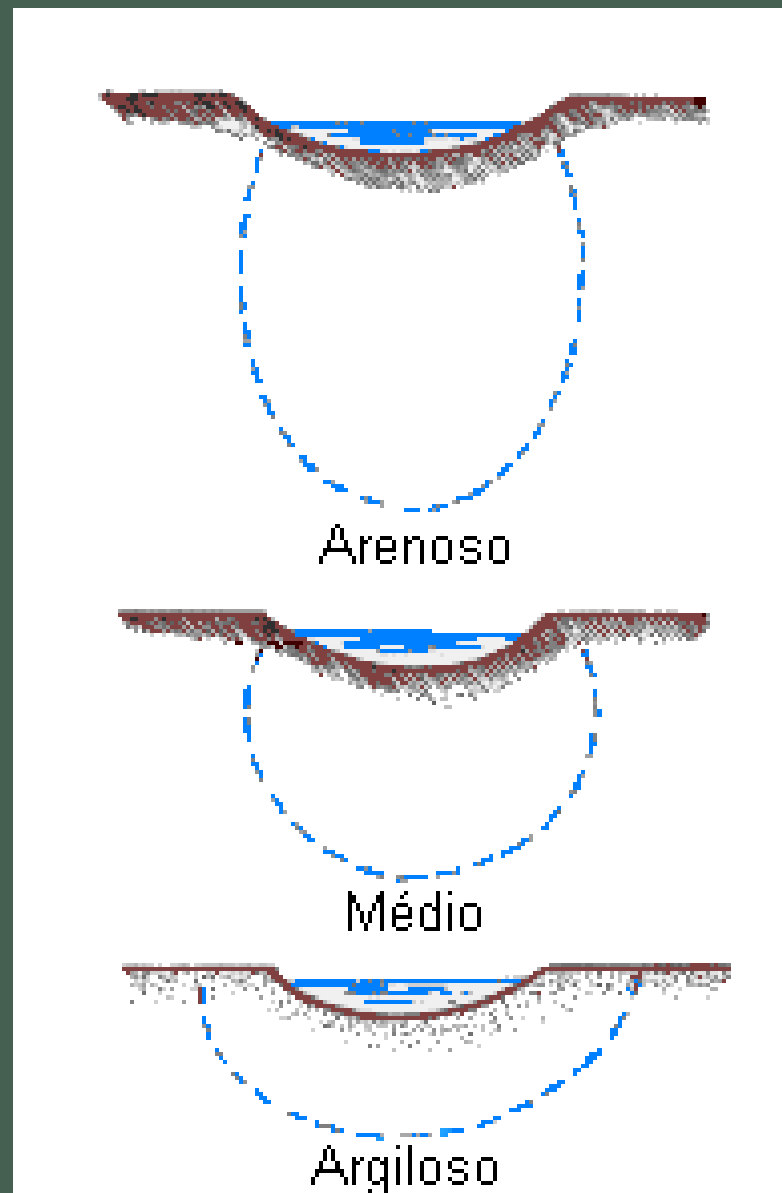
Espaçamento
entre sulcos.

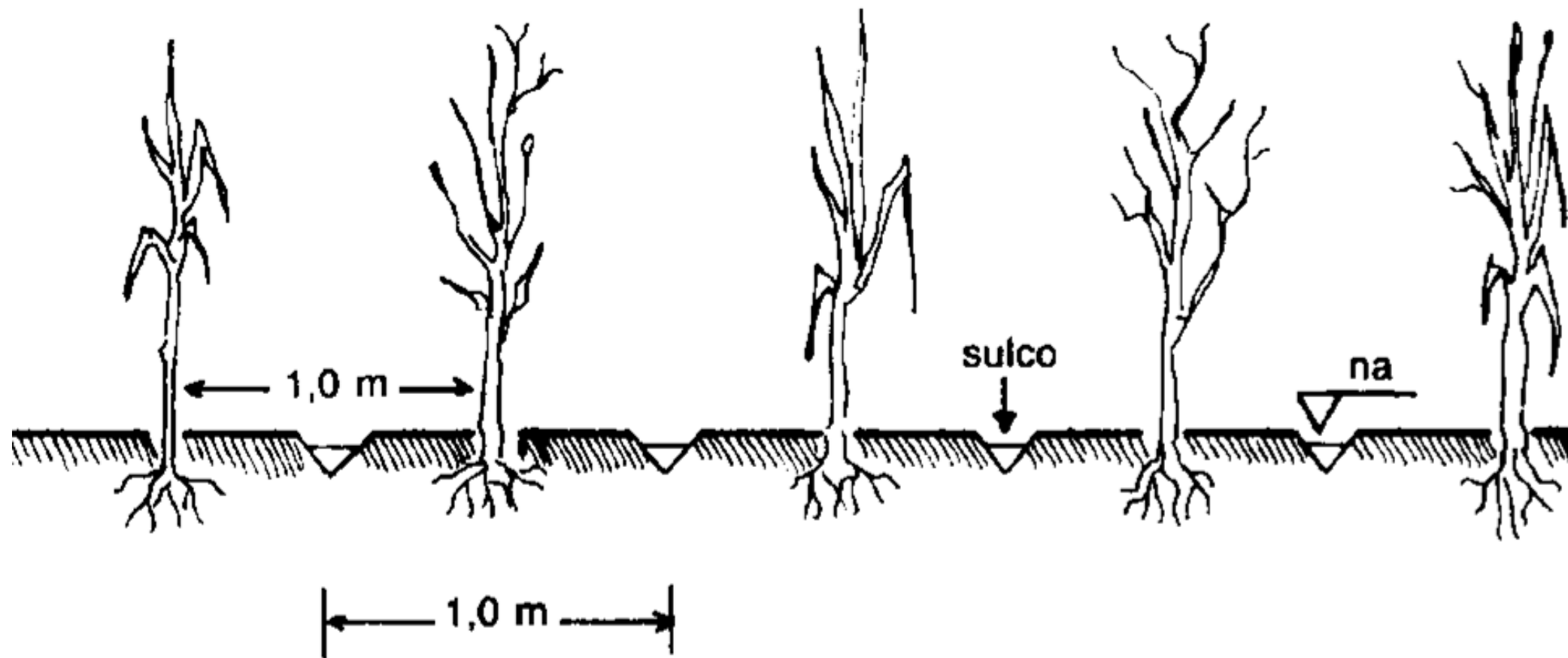
Comprimento do sulco (L em metros)

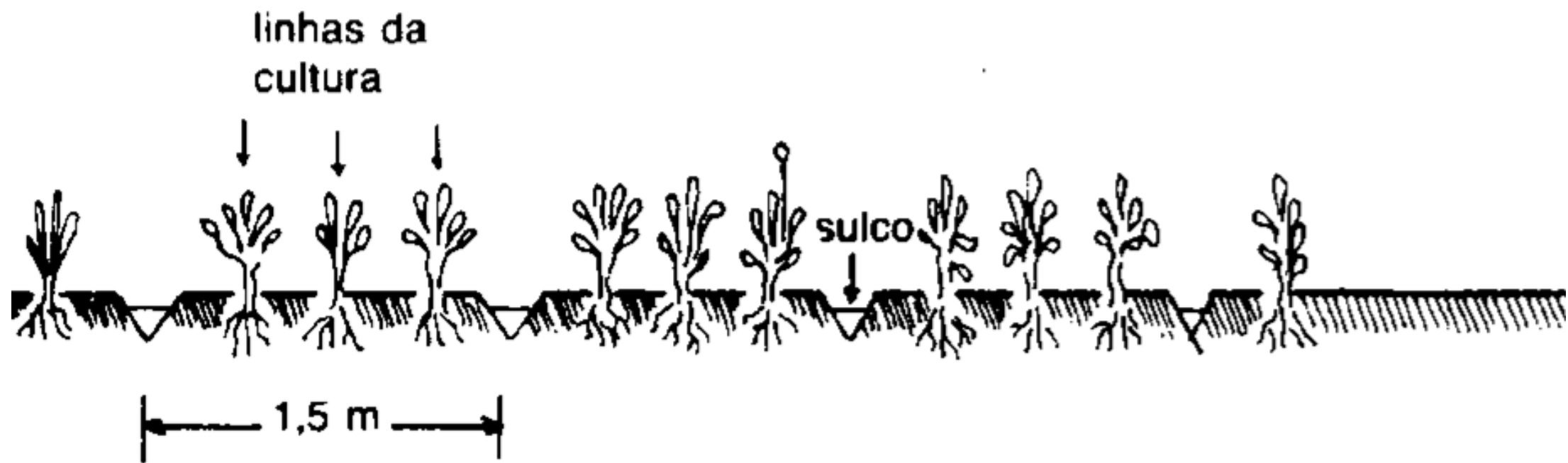


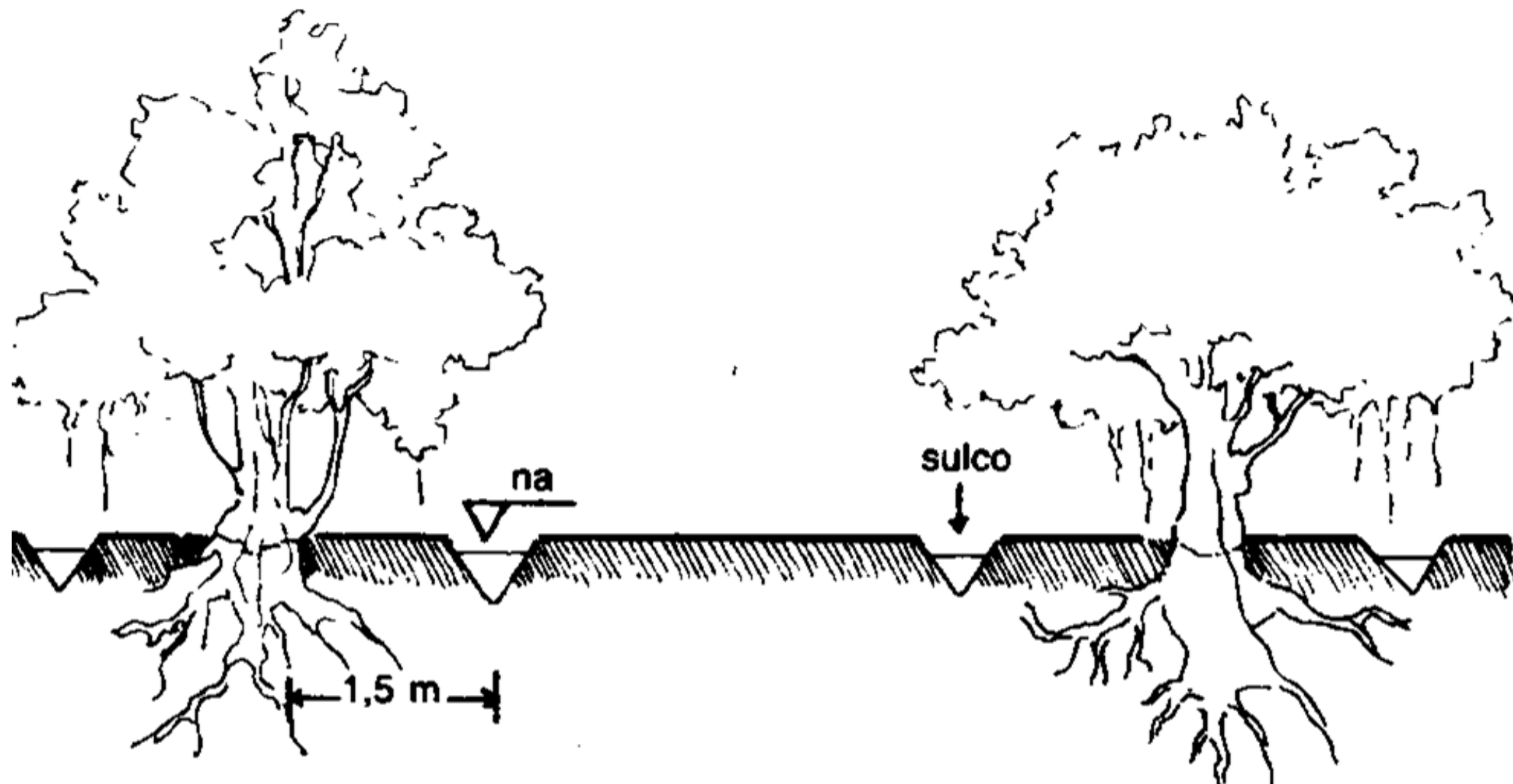
Espaçamento entre sulcos (S em metros)











- Os principais tipos de distribuição de água na irrigação por sulcos que permitem o controle da vazão aplicada são:

- canais com sifão,

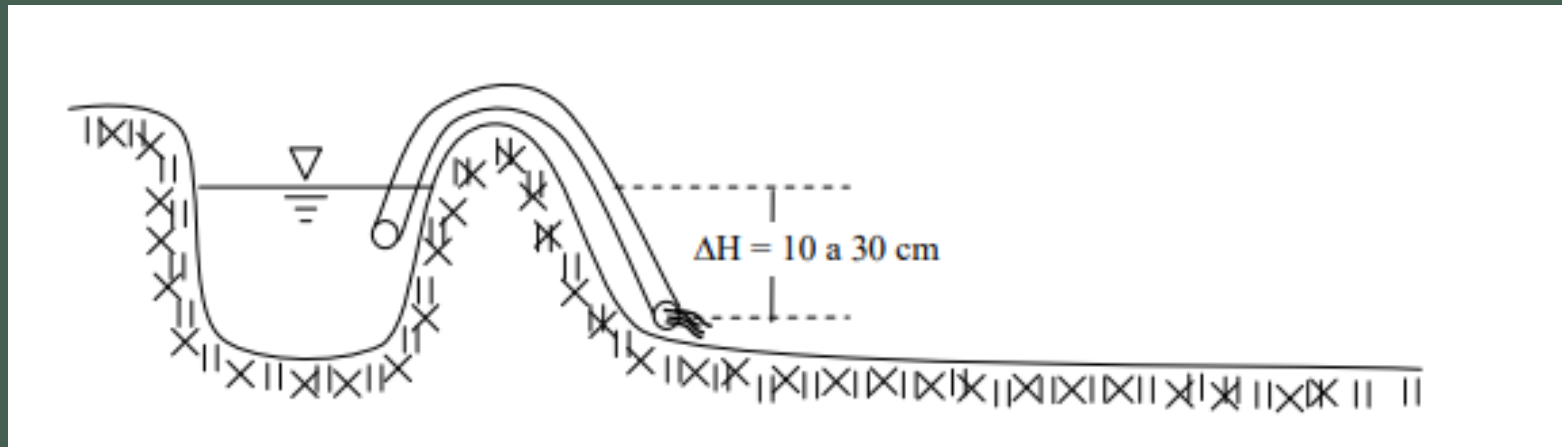


- canais com abertura manual



- tubos janelados.





<http://www.gpeas.ufc.br/disc/hidr/aula04.pdf>

Os sifões utilizados em irrigação são tubos usualmente de plástico, leves e de fácil transporte. Estão disponíveis em uma grande variedade de diâmetros (por exemplo, 1/2", 3/4", 1", 2", 3"). O comprimento varia, em geral, entre 1,0 e 2,0 m.

Um ou mais tubos pode operar em um único sulco. A eficiência de aplicação de água depende em grande parte da habilidade do irrigante em manejar os sifões

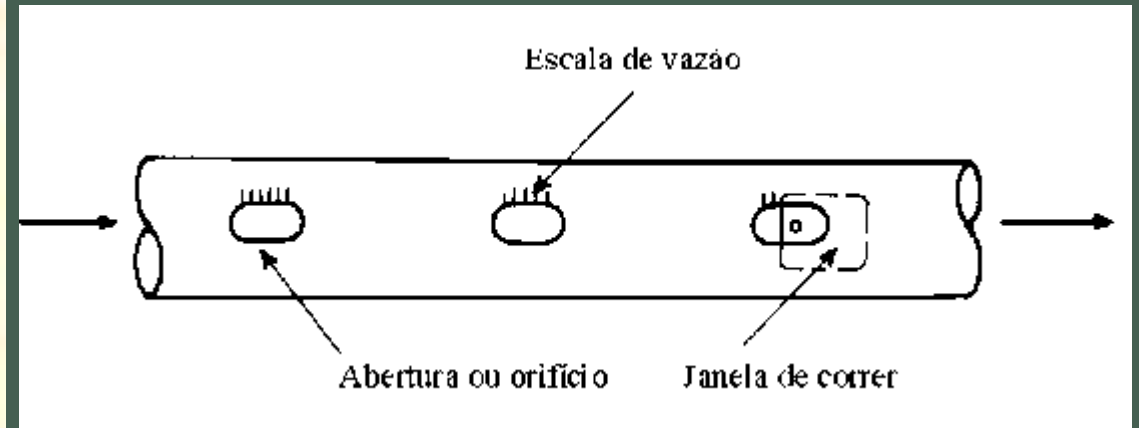


canais com
abertura
manual





SULCO COM TUBO JANELADO



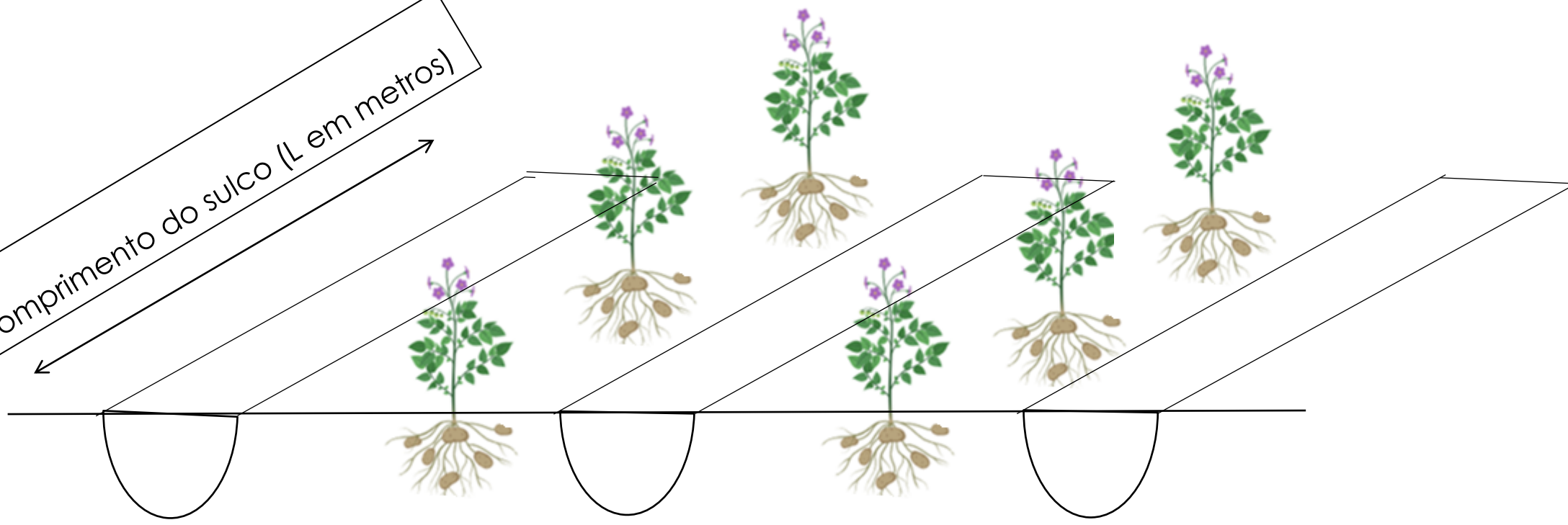
<http://www.cpac.embrapa.br/publico/usuarios/uploads/mostraresultados2015/palestra4.pdf>

<https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/articloe/view/15691>



4. FASES DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS

Comprimento do sulco (L em metros)




Espaçamento entre sulcos (S em metros)

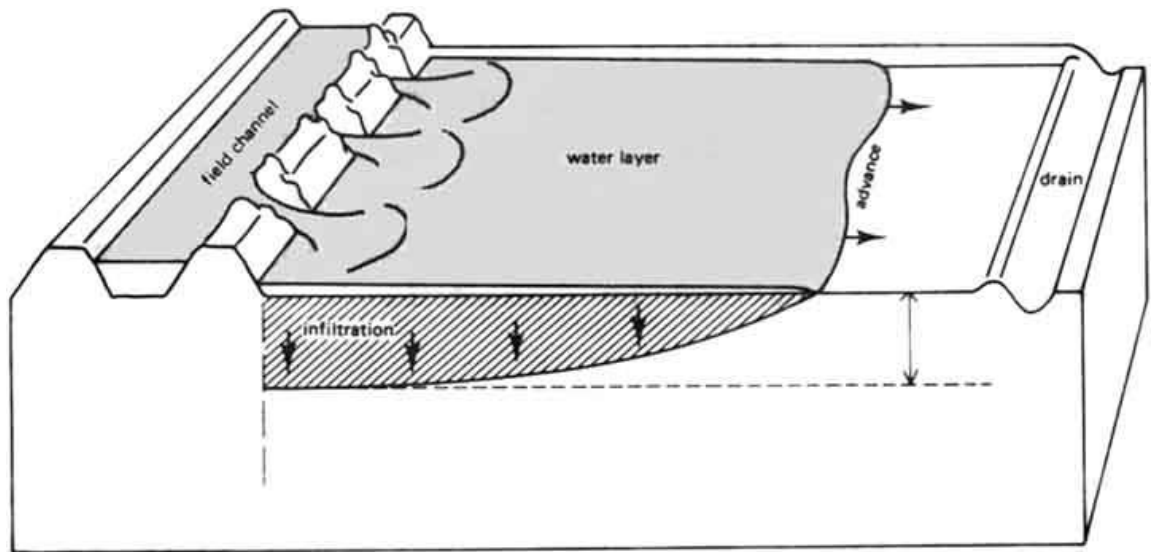
FASE DE AVANÇO: Esta fase começa com a entrada de água no início do sulco e termina quando a água chega ao final do sulco.



FASE DE REPOSIÇÃO OU DE INFILTRAÇÃO: Inicia depois que o espelho d'água está totalmente formado (final do tempo de avanço), e termina quando se interrompe a aplicação de água.

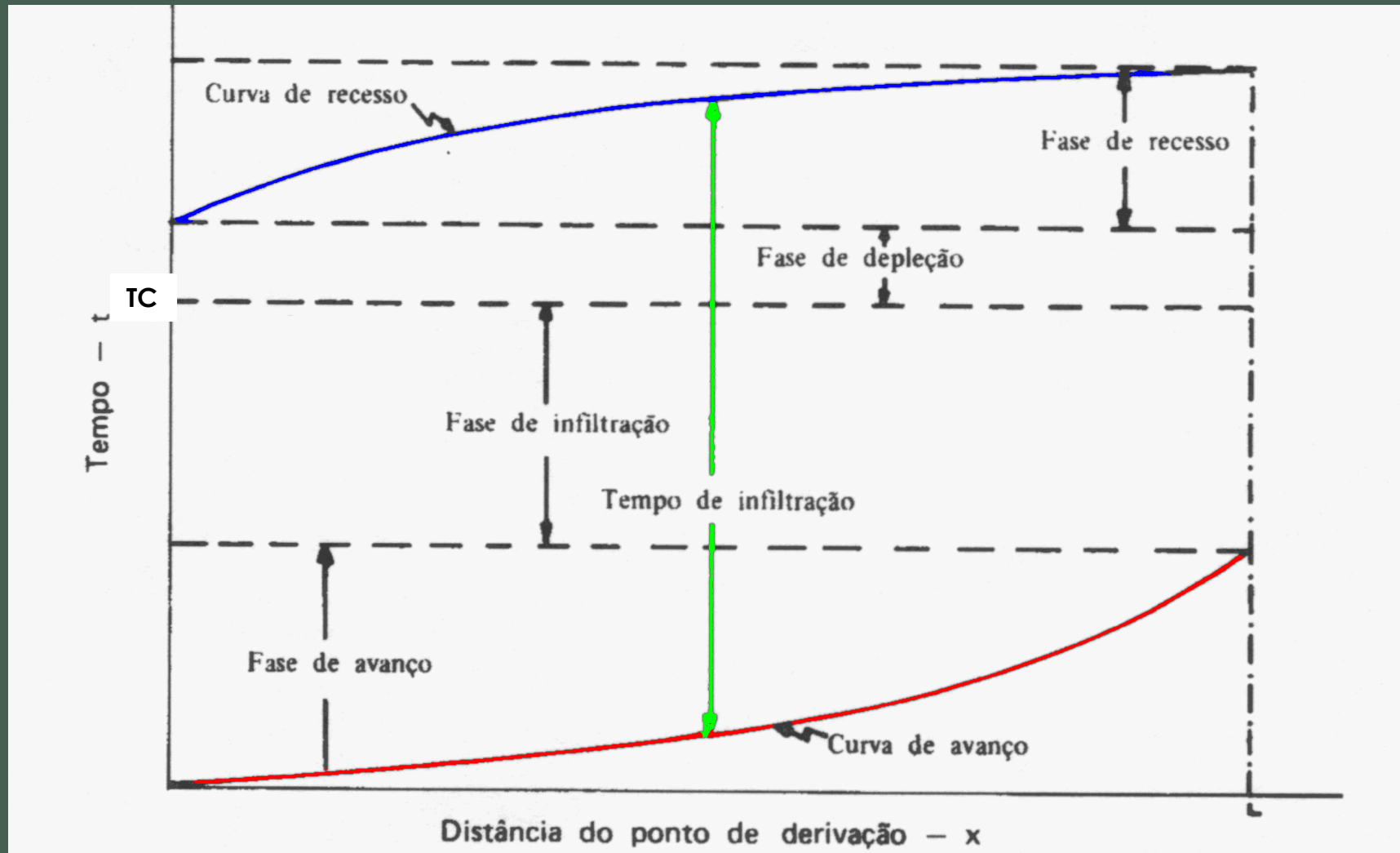


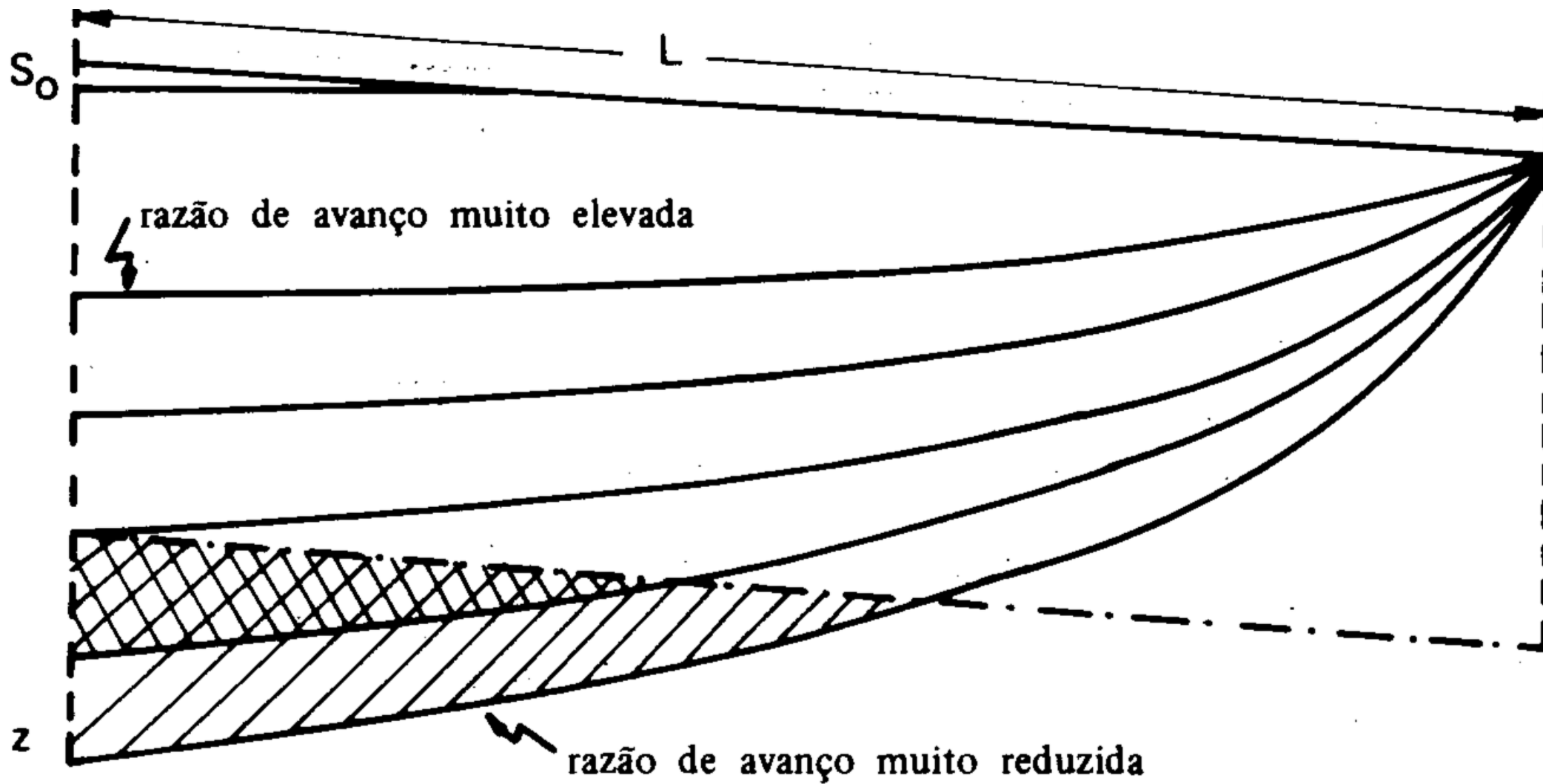
FASE DE RECESSO: Após interromper a aplicação de água até cessar todo o escoamento ao final do sulcos.

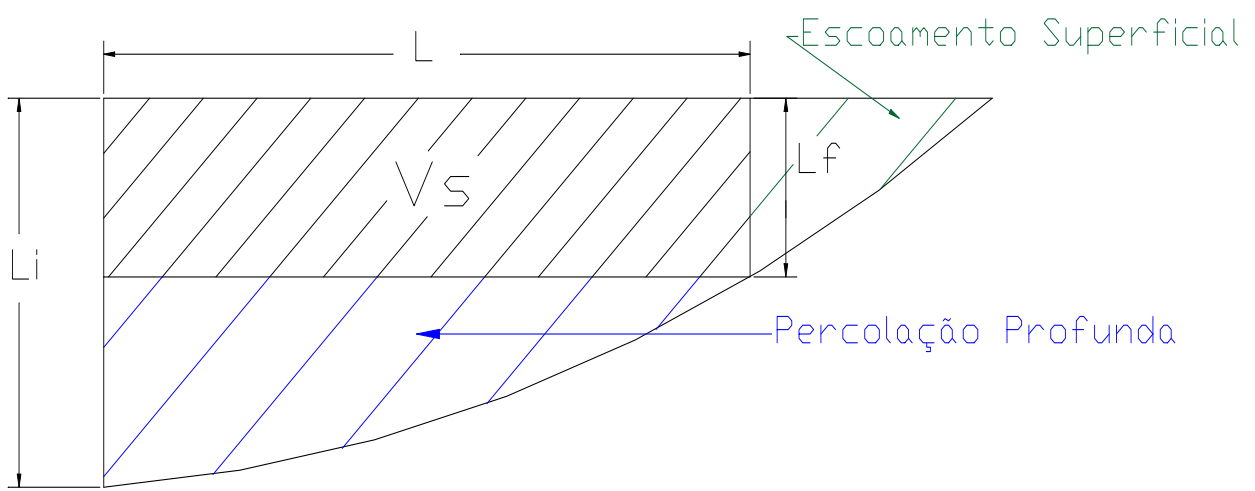
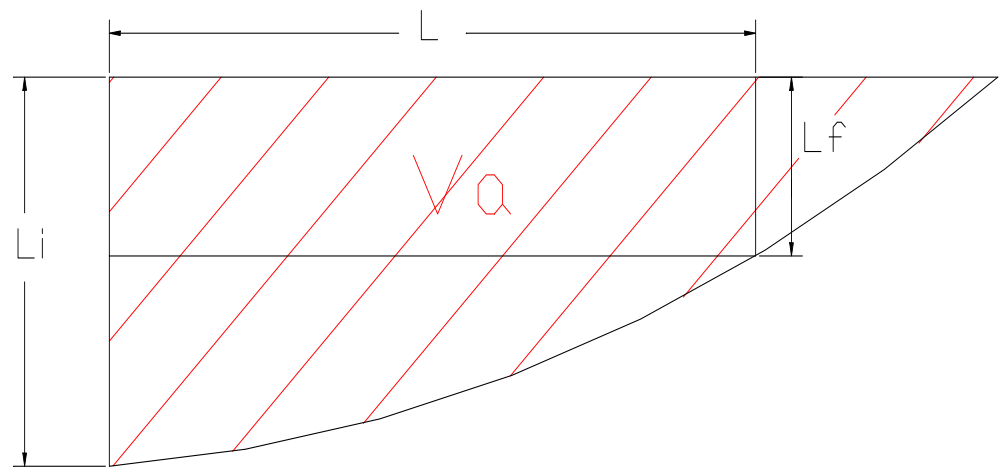


4. FASES DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS

4. FASES DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS









5. DECLIVIDADE DO SULCO

Frequentemente inferior a 2%

Valores práticos: Solos argilosos → 0,5 a 2,0%
 Solos arenosos → 0,2 a 0,5%

EXCESSO → EROSÃO

FALTA → ESTAGNAÇÃO

6. VAZÃO DERIVADA A CADA SULCO

QMAX → NÃO EROSIVA

0,2 a 2,0 L/s

comum 1,0 L/s

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{C}{S^a}$$

Textura	C	a
Muito fina	0,892	0,937
Fina	0,988	0,550
Média	0,613	0,733
Grossa	0,644	0,704
Muito grossa	0,665	0,548

6. VAZÃO DERIVADA A CADA SULCO

Prática:

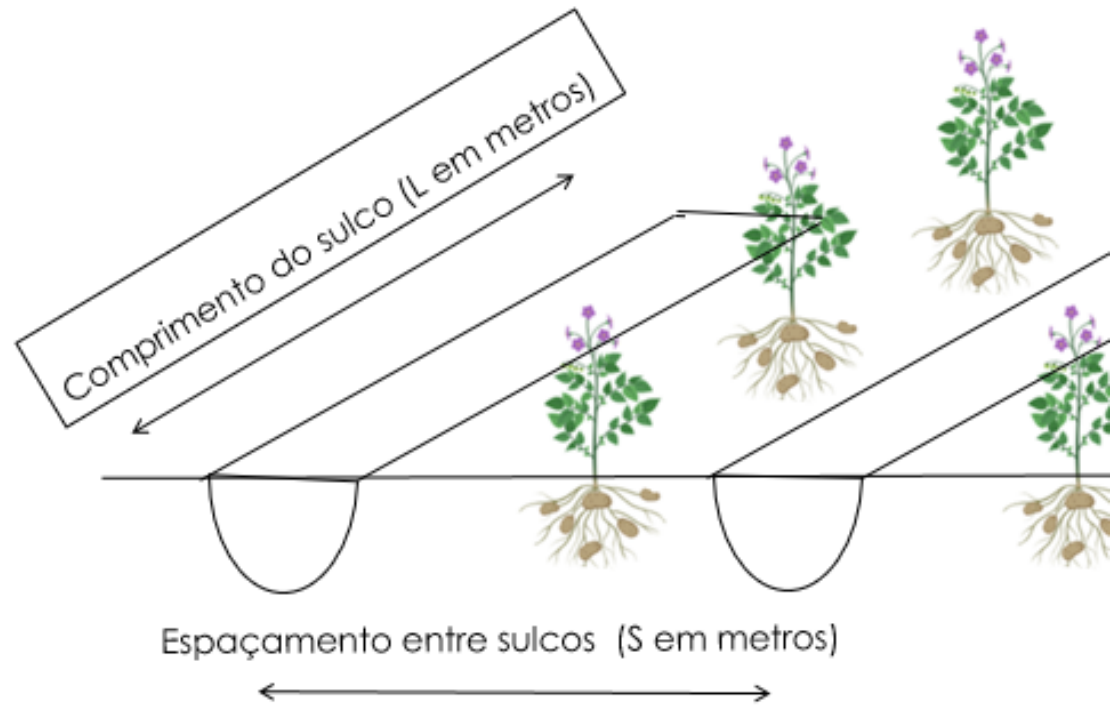
$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{0,631}{S}$$

Recomendável uso de vazão reduzida.

7. COMPRIMENTO DOS SULCOS

Fatores a
considerar:

- Tamanho e forma da área
- Tipo de solo
- Vazão
- Declividade do solo
- Mão-de-obra
- Perda de área de cultivo
- Dificuldades de mecanização
- Perdas por percolação e escoamento.

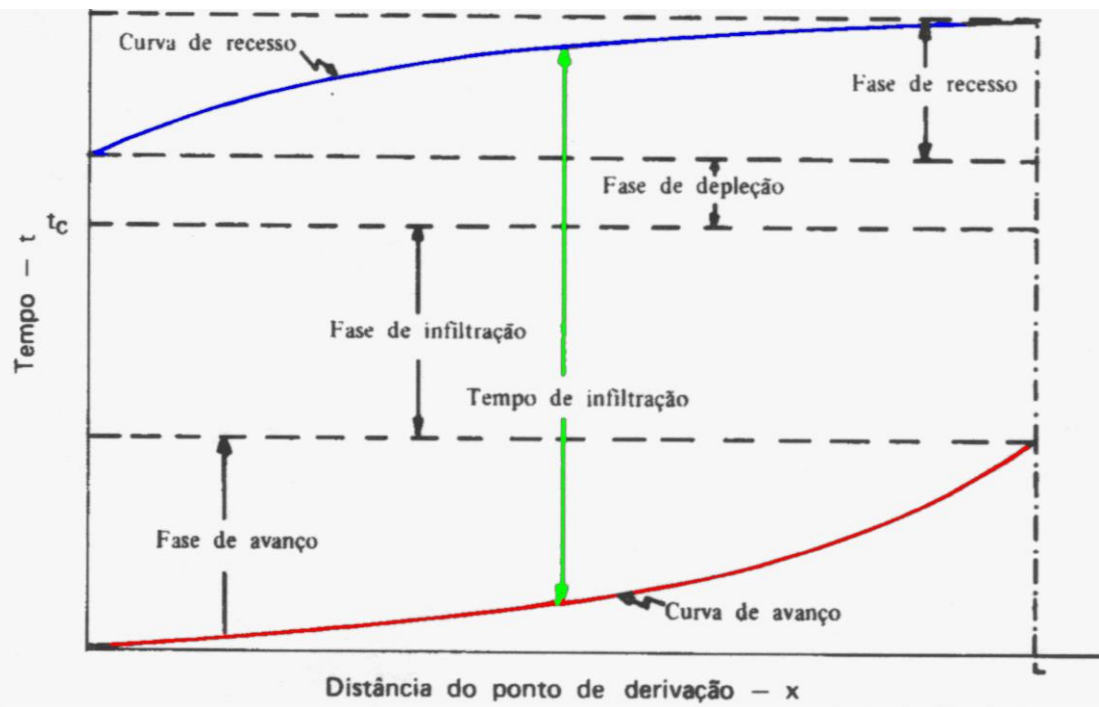


- **Sulcos longos:**

- Perda por percolação profunda
- Possibilidade de acumulação da água das chuvas causando erosão.

- **Sulcos curtos:**

- Mais trabalhoso (maior número de sulcos);
- Canais de condução → manutenção e perda de área de cultivo;
- Dificulta a mecanização da área.



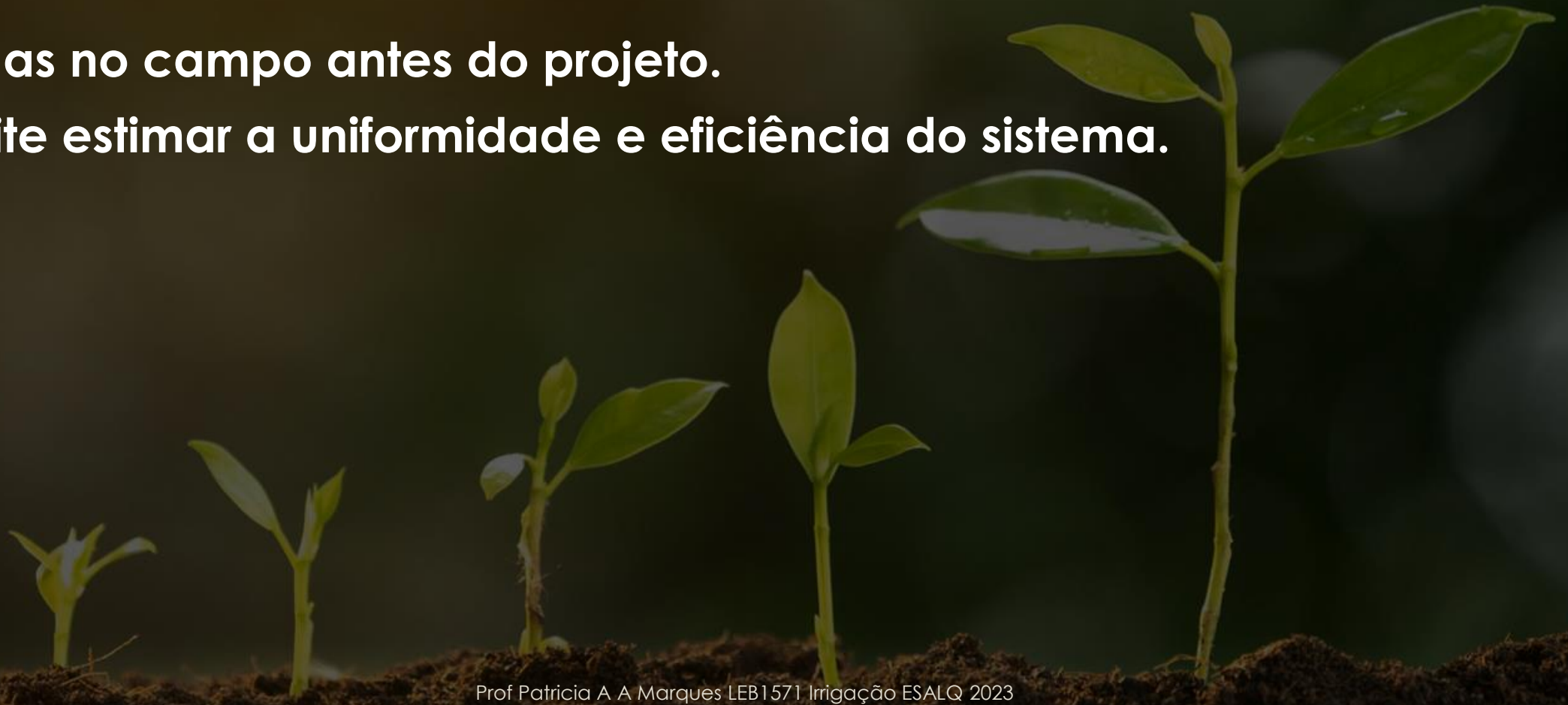
O comprimento do sulco deve ser tal que o tempo para a frente de escoamento (ou frente de avanço) atingir o final do sulco seja igual a $\frac{1}{4}$ do tempo necessário para infiltrar a lâmina de irrigação real necessária na extremidade final.

$$T_a = \frac{1}{4} T_o \rightarrow \text{define o L máximo}$$

8. DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE AVANÇO E DE INFILTRAÇÃO

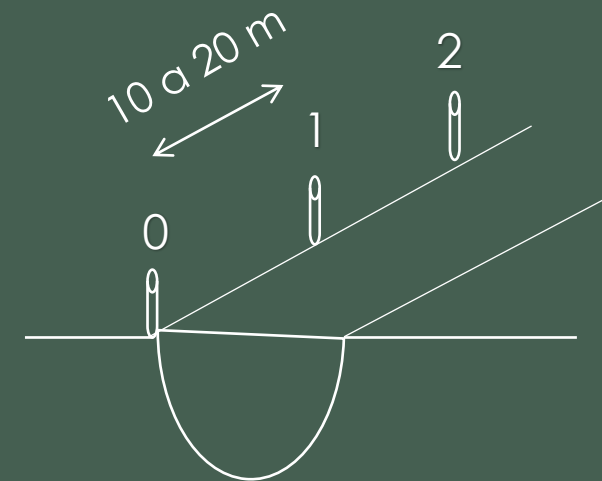
Obtidas no campo antes do projeto.

Permite estimar a uniformidade e eficiência do sistema.



Determinação da equação de avanço:

Estaca	Distância em metros (L)	Tempo de avanço em minutos T
0	0	0
1	20	2
2	40	5
3	60	9
4	80	14
5	100	21
6	120	30
7	140	40
8	160	53
9	180	69
10	200	93



$Q = 1 \text{ L/s}$

Espaçamento entre sulcos = 1 m

Estaca	L	T	x = log T	y = log L	x . y	x ²
0	0	0	-	-	-	-
1	20	2	0,30	1,30	0,39	0,09
2	40	5	0,70	1,60	1,12	0,49
3	60	9	0,95	1,78	1,70	0,91
4	80	14	1,15	1,90	2,18	1,31
5	100	21	1,32	2,00	2,64	1,75
6	120	30	1,48	2,08	3,07	2,18
7	140	40	1,60	2,15	3,44	2,57
8	160	53	1,72	2,20	3,80	2,97
9	180	69	1,84	2,26	4,15	3,38
10	200	93	1,97	2,30	4,53	3,87
		Soma	13,03	19,57	27,02	19,53
		média	1,30	1,96	2,70	1,95

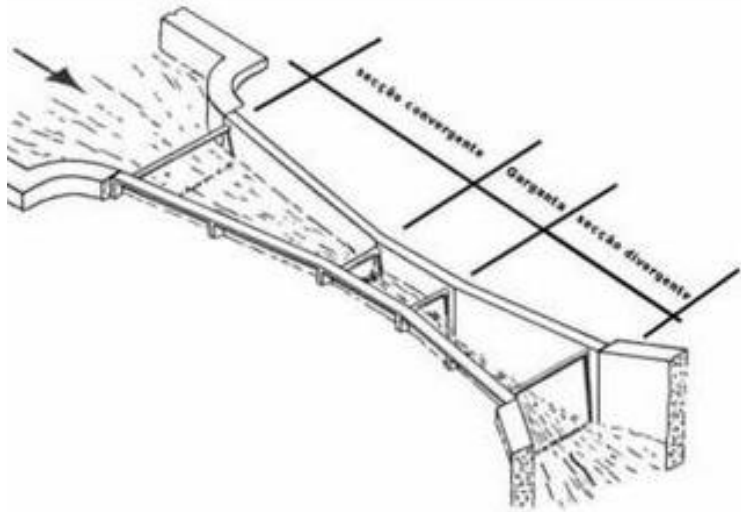
Obtêm-se então:

$$n = 0,59;$$

$$A = 1,18 \text{ e}$$

$$K = 15,16$$

$$L = 15,16 T^{0,59}$$



CURVA DE INFILTRAÇÃO

Equação de infiltração: Método da entrada e saída

$$Q = 1 \text{ L/s}$$

Espaçamento entre sulcos = 1 m



CURVA DO MEDIDOR WSC



Calibration curve for a typical WSC flume

Tempo (min)	Vazão (L/s) 100 m		Infiltração	
	Estaca 0	Estaca 5	L/s.100m	mm/h
0	1	0	-	-
2	1	0,19	0,81	29,2
9	1	0,50	0,50	18,0
19	1	0,63	0,37	13,3
29	1	0,66	0,34	12,2
49	1	0,71	0,29	10,4
64	1	0,73	0,27	9,7
79	1	0,75	0,25	9,0
89	1	0,76	0,24	8,6
101	1	0,77	0,23	8,3
119	1	0,78	0,22	7,9
149	1	0,78	0,22	7,9

Equação de infiltração: Método da entrada e saída

Obtêm-se então:

$$n = -0,32;$$

$$A = 1,546 e$$

$$K = 35,23$$

$$VI = 35,23 T^{-0,32}$$

$$I = \frac{35,23}{(-0,32 + 1) * 60} T^{(-0,32+1)}$$

=

$$I = 0,86 T^{0,68}$$

$VI = 0,81 \frac{L}{s}$ em sulco com $L = 100m$ e $S = 1m$

Ou seja $0,81 \text{ L/s}$ em $100m^2$

$$\frac{0,81 \frac{L}{s} \cdot 3600 \frac{s}{h}}{100m^2} = 29,16 = \frac{29,2mm}{h}$$

9 PARÂMETROS DA AVALIAÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS

Lâmina média aplicada.

$$ya = \frac{TC \cdot qo \cdot 60}{L \cdot E}$$

- ya = lâmina média aplicada em cada sulco (mm);
- TC = tempo de total aplicação de água no sulco (minutos)
- qo = vazão aplicada no sulco (L/s);
- L = comprimento do sulco (m);
- E = espaçamento entre sulcos (m).

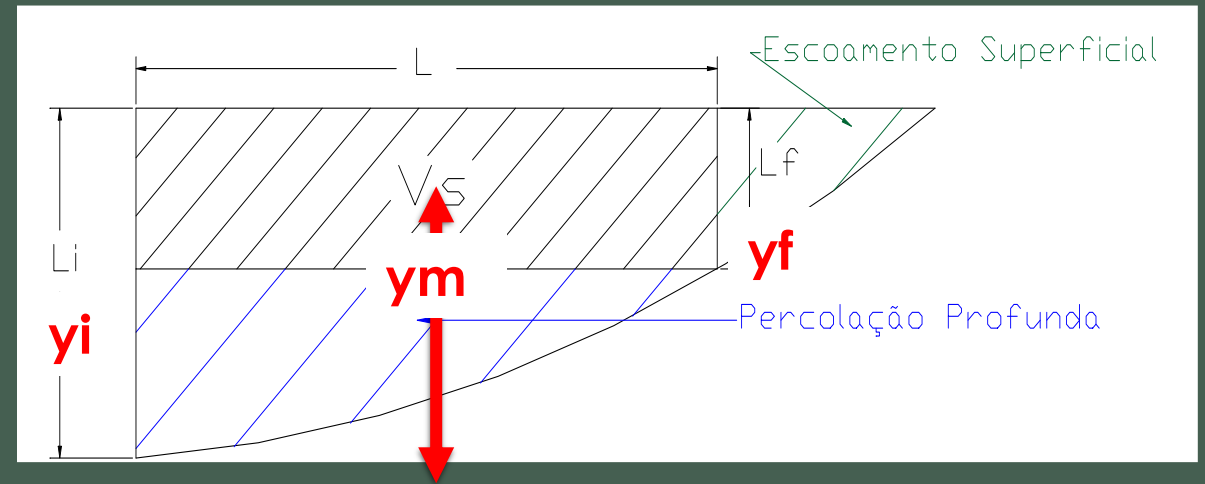
Lâmina média aplicada com redução de vazão.

$$y_a = \frac{(T_a \cdot q_o + T_i \cdot q_r) \cdot 60}{L \cdot E}$$

- y_a = lâmina média aplicada em cada sulco (mm);
- T_a = tempo avanço (minutos);
- T_i = tempo de oportunidade para aplicar LL (minutos)
- q_o = vazão aplicada no sulco (L/s);
- q_r = vazão reduzida aplicada no sulco (L/s).

Lâmina média infiltrada.

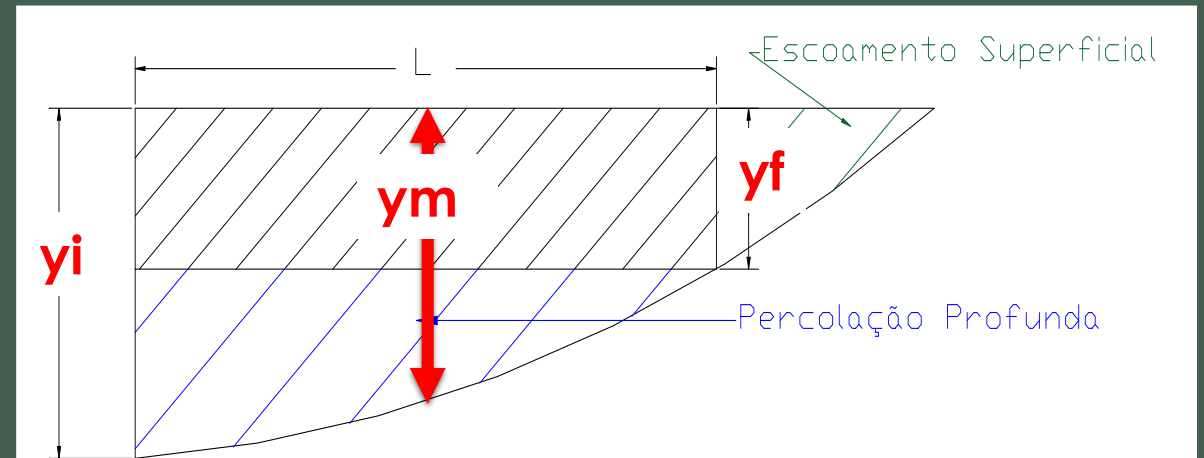
$$y_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} = \frac{y_i + y_f}{2}$$



- y_m = lâmina média infiltrada no sulco (mm);
- i = estaca de 10 em 10;
- n = total de estacas;
- y_i = lâmina infiltrada na estaca i (mm);
- y_f = lâmina aplicada no final do sulco (mm);
- y_i = lâmina aplicada no início do sulco (mm).

Uniformidade de Distribuição.

$$UD = \frac{Y_{mínima}}{ym} \cdot 100$$



- UD = Uniformidade de Distribuição (%);
- $Y_{mínima}$ = Lâmina Líquida necessária (mm) = IRN = y_r .

Eficiência de condução.

- tubulações as perdas são praticamente nulas e a eficiência 100%.
- Canais ocorrem perdas por infiltração

$$EC = \left(\frac{Va}{Vd} \right) \times 100$$

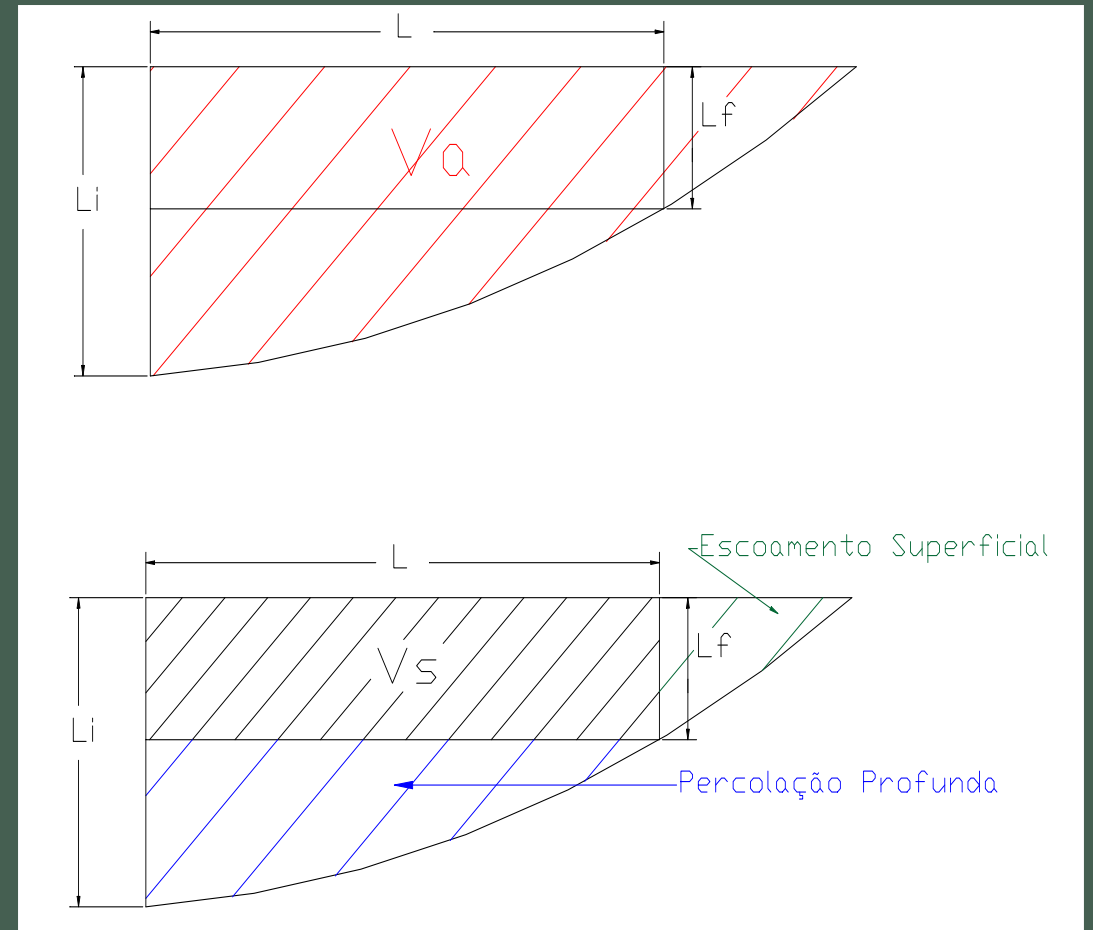
Eficiência de aplicação

Ideal $\geq 75\%$ e aceitável $\geq 60\%$.

$$Ea = \frac{LL}{ya} \cdot 100$$

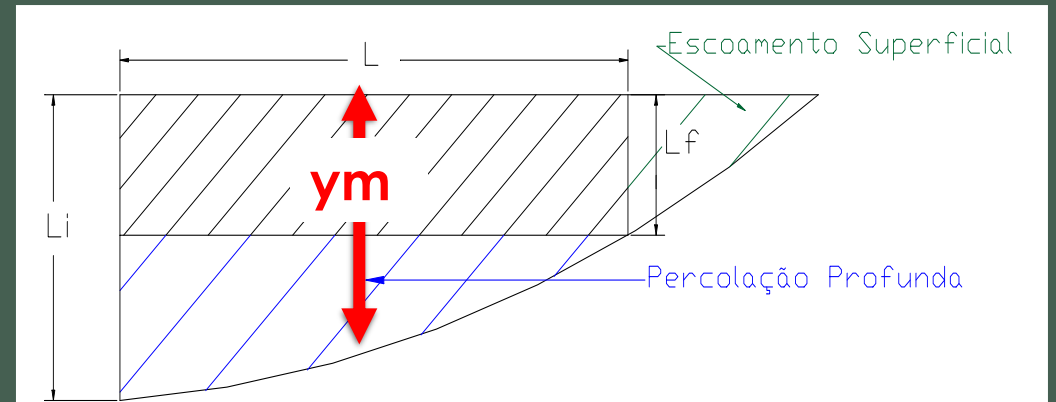
- Ea = Eficiência de Aplicação (%);
- LL = Lâmina Líquida necessária (mm) = $IRN = yr = ys$.

100% - Ea = perdas por percolação profunda e por escoamento superficial



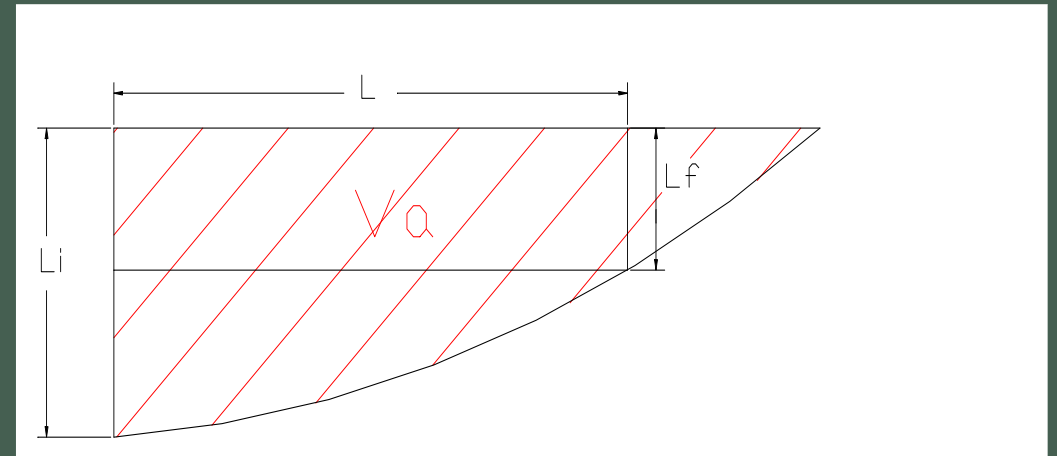
Perdas por percolação profunda:

$$P_p = \frac{y_m - LL}{y_a} \cdot 100$$



Perdas por escoamento superficial:

$$P_e = \frac{y_a - y_m}{y_a} \cdot 100$$



Principais causas de desempenho insatisfatório

- **Problemas de uniformidade**

- UD: variações da quantidade de água infiltrada na área irrigada.

- dimensionamento inadequado (comprimento excessivo, vazão muito reduzida, tempo de aplicação muito reduzido, etc.) ;

- sistematização grosseira (variação acentuada do gradiente de declive) e variação no solo;

Principais Práticas de Manejo

- **Para aumentar a uniformidade de distribuição**
 - aumentar a vazão;
 - aumentar o tempo de aplicação;
 - reduzir o comprimento das parcelas;
 - aumentar o gradiente de declive;
 - construir diques para contenção de água no final das parcelas;
 - adotar um sistema de fluxo pulsante ("pulse" ou "surge flow"). A aplicação de água à parcela em períodos curtos e alternados.

Principais causas de desempenho insatisfatório

- **Problemas de eficiência**

- dimensionamento inadequado (comprimento muito reduzido ou muito longo, vazão muito reduzida ou muito elevada, tempo de aplicação muito reduzido ou muito elevado etc.) ;
- variação das características de infiltração;
- operação inadequada do sistema.

Principais Práticas de Manejo

- **Para aumentar a eficiência de aplicação**
- Perdas por percolação profunda:
 - aumentar a vazão (para aumentar a razão de avanço);
 - reduzir o comprimento das parcelas;
 - aumentar o gradiente de declive;
 - reduzir o perímetro molhado da seção de escoamento (modificando a forma da seção transversal dos sulcos).

Principais Práticas de Manejo

- **Para aumentar a eficiência de aplicação**
- Perdas por escoamento superficial:
 - reduzir a vazão, após a água atingir o final da parcela;
 - aumentar o comprimento das parcelas;
 - reduzir o gradiente de declive;
 - aumentar o perímetro molhado da seção de escoamento;
 - contenção de água no final das parcelas;

10 PROJETO

Área da parcela =
14 ha (350 x 400m)

Milho:
espaçamento de 1m;
 $z = 50\text{cm}$; $f = 0,5$ e
 $E_{tm} = 4,2 \text{ mm/dia}$

Solo:
 $U_{cc} = 28\%$;
 $U_{pmp} = 17\%$;
 $d_s = 1,4 \text{ g/cm}^3$;
 $VIB = 9,9 \text{ mm/h}$

Q utilizada
coeficiente $C = 0,631$
e $a = 1$

Equação de avanço:
 $L \text{ (m)} = 15 T \text{ (min)}^{0,59}$

Equação de velocidade
de infiltração:
 $I \text{ (mm)} = 0,87 T \text{ (min)}^{0,68}$

Área da parcela =
14 ha
(350 x 400m)

400 m

↓ 0,1%

350m

→ 0,5%

VAZÃO DERIVADA A CADA SULCO

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{C}{S^a} = \frac{0,631}{0,5^1} = 1,2 \text{ L/s}$$

Adotado 1 L/s

Passo 1)
$$DRA = \frac{U_{cc} - U_{pmp}}{10} \cdot ds \cdot z \cdot f = \frac{28-17}{10} \cdot 1,4 \cdot 50 \cdot 0,5 = 38,5 \text{ mm}$$

Passo 2) Turno de Rega (TR) =
$$\frac{DRA}{ET_m} = \frac{38,5 \text{ mm}}{4,2 \text{ mm/dia}} = 9,1 = 9 \text{ dias}$$

Período de irrigação = $9 - 1 = 8 \text{ dias}$

Passo 3) Lâmina de irrigação = $IRN = LL = yr = E_{tm} \cdot TR$

$$yr = 4,2 \frac{\text{mm}}{\text{dia}} \cdot 9 \text{ dias} = 37,8 \text{ mm}$$

FASE DE AVANÇO: Esta fase começa com a entrada de água no início do sulco e termina quando a água chega ao final do sulco.



FASE DE REPOSIÇÃO OU DE INFILTRAÇÃO: Inicia depois que o espelho d'água está totalmente formado (final do tempo de avanço), e termina quando se interrompe a aplicação de água.

$T_a = \frac{1}{4} T_i \rightarrow$ define o L máximo

Passo 4) Tempo de irrigação (T_i)

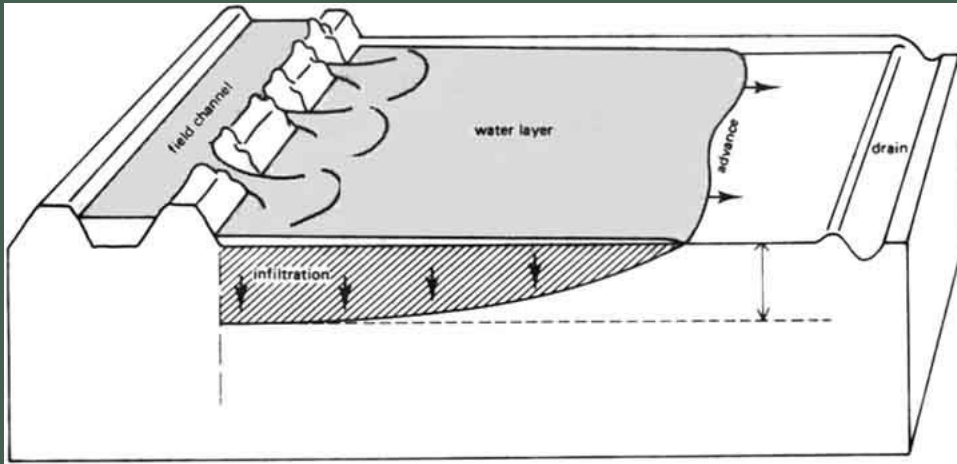
T_i = tempo para infiltrar yr no solo

Utiliza equação de infiltração acumulada que varia com o solo

No nosso projeto: $I(\text{mm}) = 0,87 T(\text{min})^{0,68}$

$$37,8 \text{ mm} = 0,87 \cdot T_i^{0,68}$$

$$T_i = \left(\frac{37,8}{0,87} \right)^{\left(\frac{1}{0,68} \right)} = 256,32 \text{ minutos}$$



FASE DE AVANÇO: Esta fase começa com a entrada de água no início do sulco e termina quando a água chega ao final do sulco.

Passo 5) tempo de avanço (T_a)

$$T_a \text{ máximo} \leq \frac{1}{4} T_i = \frac{1}{4} \cdot 256,32 \text{ minutos} = 64,1 \text{ minutos}$$

Passo 6) Comprimento máximo do sulco(L)

Utiliza a equação de avanço. No nosso projeto:

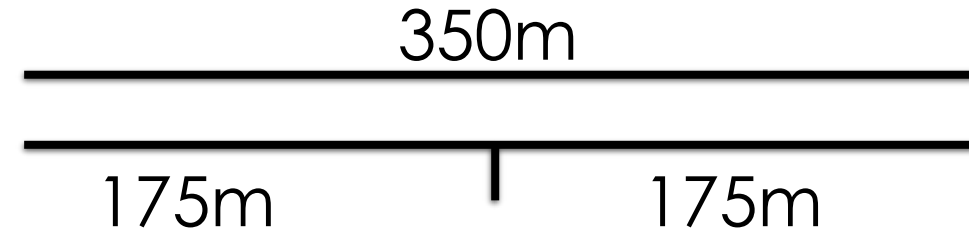
$$L(m) = 15 \cdot Ta(\text{min})^{0,59}$$

$$L(m) = 15 \cdot 64,1^{0,59}$$

$$L \text{ máximo} = 174 \text{ m}$$



A área tem 350 x 400m
Utilizaremos para os sulcos a área de 0,5 %
de declividade



Temos que deixar espaço disponível para o canal de distribuição da água ao sulco, canal de coleta no final do sulco e espaço para movimentação na área.

Temos 175 m e L máximo de 174m

Adotado L = 170 m

Por alterar o L do sulco é necessário corrigir o Ta

$$L = 15 \cdot Ta^{0,59} \quad \rightarrow \quad 170 = 15 \cdot Ta^{0,59}$$

$$Ta = \left(\frac{170}{15} \right)^{\left(\frac{1}{0,59} \right)} = 61,2 \text{ minutos}$$

Resumo:

$$L = 170 \text{ m}$$

$$Ta = 61,2 \text{ minutos}$$

$$Ti = 256,32 \text{ minutos}$$

Passo 7) Tempo de corte (T_c) = tempo que será realizada a irrigação.

Considera desde o momento que se inicia a derivação de água ao sulco até o término da irrigação (infiltração da yr no final do sulco).

$$T_c = T_a + T_i = 61,2 + 256,32 = 317,52 \text{ minutos} = 5 \text{ h } 17'$$

Resumo:

$$L = 170 \text{ m}$$

$$T_a = 61,2 \text{ minutos}$$

$$T_i = 256,32 \text{ minutos}$$

$$T_c = 5 \text{ h } 17'$$

Passo 8) Número de sulcos na área

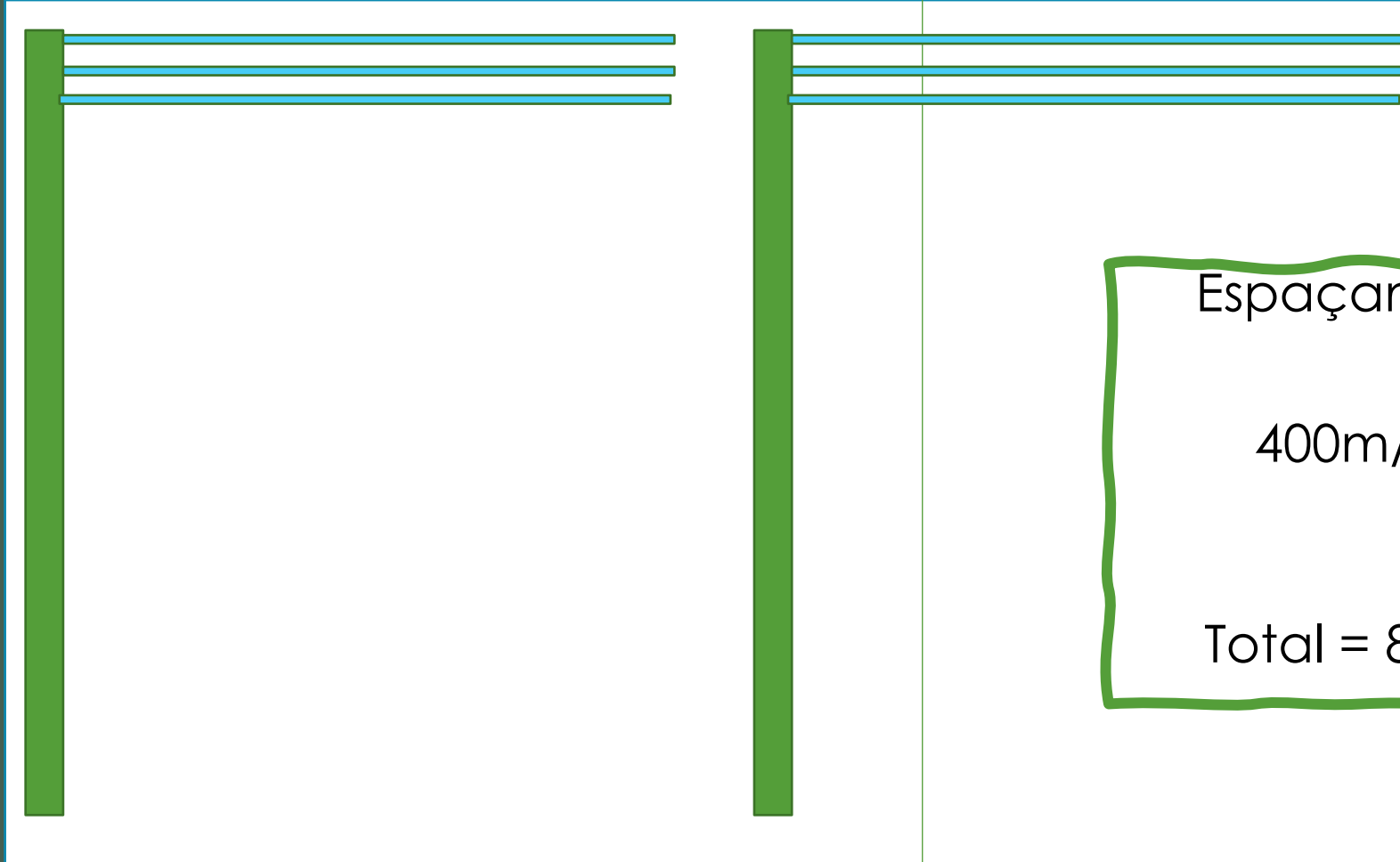
Espaçamento adotado igual da cultura
 $S = 1\text{ m}$

Sulcos distribuídos em 400 m

350m → 0,5%

400 m

↓ 0,1%



Espaçamento entre sulcos
 $S = 1\text{m}$

$400\text{m}/1\text{m} = 400$ sulcos

2 lados

Total = 800 sulcos na área

O TR é de 9 dias mas o período de irrigação é de 8 dias

A irrigação é realizada em 8 dias + 1 dia para manutenção
com lâmina de 9 dias = 37,8 mm

Assim são 800 sulcos /8 dias = 100 sulcos irrigados por dia

Podemos fazer:

50 sulcos (5h17') de manhã e 50 sulcos (5h17') a tarde

Vazão necessária por irrigação: $Q = 50 \text{ sulcos} \cdot 1\text{L/s} = 50 \text{ L/s}$

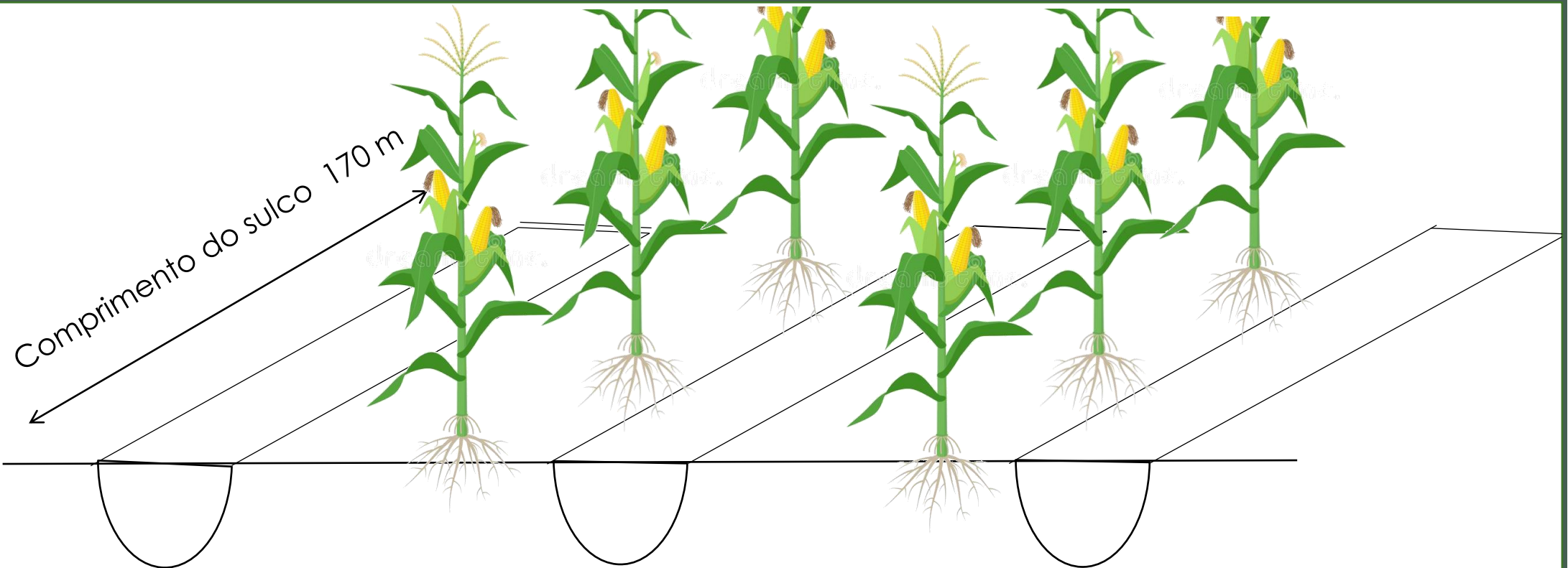
Passo 9) Avaliação da Irrigação

T_c = tempo que será realizada a irrigação.

Considera desde o momento que se inicia a derivação de água ao sulco até o término da irrigação (infiltração da yr no final do sulco).

$$T_c = T_a + T_i = 61,2 + 256,32 = 317,52 \text{ minutos}$$

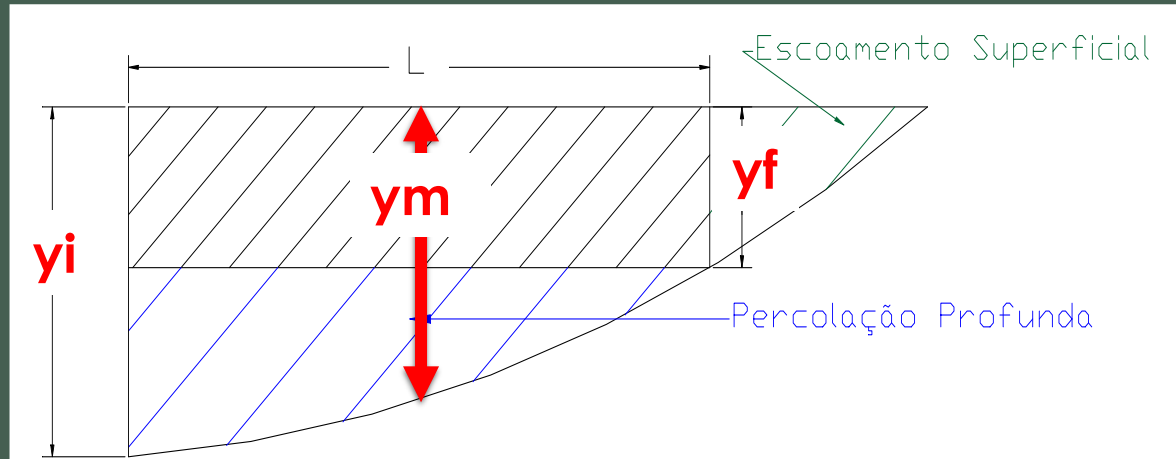
$$T_c = 317,52 \text{ minutos} = 5 \text{ h } 17'$$



Comprimento do sulco 170 m

Espaçamento 1 m

$$\text{Área molhada} = 170 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} = 170 \text{ m}^2$$



Lâmina inicial = $L_i = y_i$
 será a maior lâmina infiltrada.
 Recebeu água por 317,52 minutos (5 h 17').
 $I(\text{mm}) = 0,87 T(\text{min})^{0,68}$
 $I(\text{mm}) = 0,87 \cdot 317,52^{0,68}$
 $I(\text{mm}) = 43,72 \text{ mm}$

$y_i = y \text{ máxima} = 43,72 \text{ mm}$

Lâmina final = $L_f = y_f = y_r$
 será a menor lâmina infiltrada.
 Recebeu água por 256,32' (4 h 16')
 $I(\text{mm}) = 0,87 T(\text{min})^{0,68}$
 $I(\text{mm}) = 0,87 \cdot 256,32^{0,68}$
 $I(\text{mm}) = 37,8 \text{ mm}$

$y_f = y \text{ mínima} = 37,8 \text{ mm}$

◆ Lâmina média infiltrada

$$y_m = \frac{y_i + y_f}{2} = \frac{43,72 + 37,8}{2} = 40,76 \text{ mm}$$

- y_m = lâmina média infiltrada no sulco (mm);
- y_i = lâmina máxima infiltrada (mm);
- y_f = lâmina mínima infiltrada no final do sulco (mm);

◆ Uniformidade de Distribuição.

$$UD = \frac{Y_{\text{mínima}}}{y_m} \cdot 100 = \frac{37,8 \text{ mm}}{40,76 \text{ mm}} \cdot 100 = \mathbf{92,74 \%} > 80\% \text{ bom}$$

Lâmina média aplicada.

$$y_a = \frac{TC \cdot q_o \cdot 60}{L \cdot E} = \frac{317,52 \text{ min} \cdot 1 \text{ L/s} \cdot 60}{170 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}} = \mathbf{112 \text{ mm}}$$

- y_a = lâmina média aplicada em cada sulco (mm);
- TC = tempo de total aplicação de água no sulco (minutos)
- q_o = vazão aplicada no sulco (L/s);
- L = comprimento do sulco (m);
- E = espaçamento entre sulcos (m).

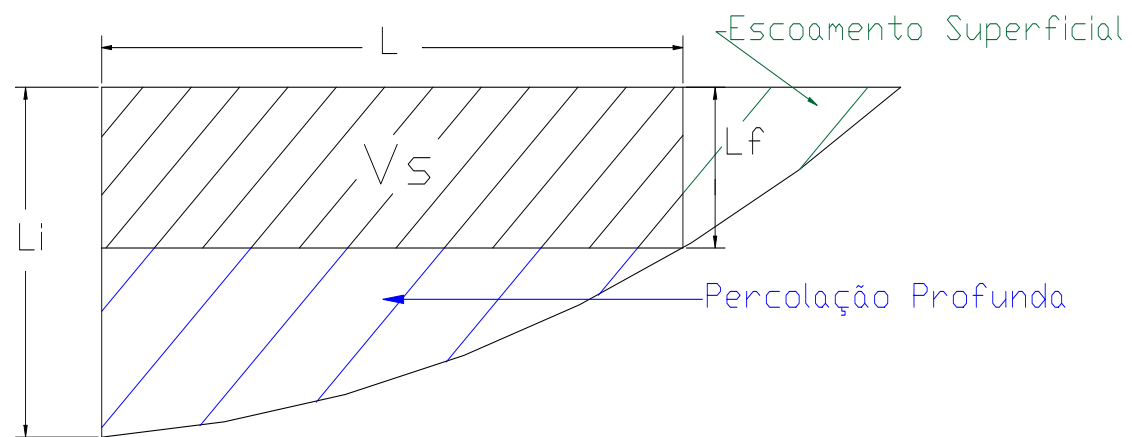
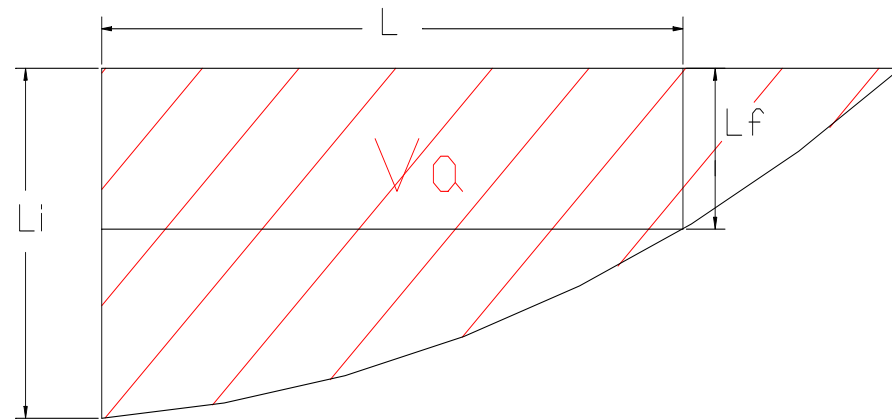
Eficiência de aplicação

Ideal quando $\geq 75\%$ e aceitável quando $\geq 60\%$.

$$Ea = \frac{LL}{ya} \cdot 100 = \frac{37,8 \text{ mm}}{112 \text{ mm}} \cdot 100 = 33,75 \%$$

- Ea = Eficiência de Aplicação (%);
- LL = Lâmina Líquida necessária (mm).

100% - Ea = perdas por percolação profunda e por escoamento superficial = **66,25%**



$$P_p = \frac{y_m - LL}{y_a} \cdot 100 = \frac{40,76 \text{ mm} - 37,8 \text{ mm}}{112 \text{ mm}} \cdot 100$$

$$P_p = 2,64 \% < 12 \% \text{ OK}$$

$$P_e = \frac{y_a - y_m}{y_a} \cdot 100 = \frac{112 \text{ mm} - 40,76 \text{ mm}}{112 \text{ mm}} \cdot 100$$

$$P_e = 63,60 \% > 25 \% \text{ alto}$$

Para aumentar a eficiência de aplicação

Perdas por escoamento superficial:

- reduzir a vazão, após a água atingir o final da parcela;
- aumentar o comprimento das parcelas;
- reduzir o gradiente de declive;
- aumentar o perímetro molhado da seção de escoamento;
- contenção de água no final das parcelas;

• Vazão Reduzida (Q_r)

- No tempo de avanço mantém a vazão de 1 L/s
- Na infiltração utiliza Q_r

$$Q_r = 1,1 \cdot \frac{VIB \left(\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right) \cdot L \text{ (m)} \cdot S \text{ (m)}}{3600}$$

$$Q_r = 1,1 \cdot \frac{9,9 \cdot 170 \cdot 1}{3600} = 0,51 \text{ L/s}$$

◆ Lâmina média aplicada com redução de vazão.

$$y_a = \frac{\left(61,2 \text{ min} \cdot 1 \frac{L}{S} + 256,32 \text{ min} \cdot 0,50\right) \cdot 60}{170 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}} = 67,7 \text{ mm}$$

◆ Eficiência de aplicação (Ideal $\geq 75\%$ e aceitável $\geq 60\%$)

$$E_a = \frac{LL}{y_a} \cdot 100 = \frac{37,8 \text{ mm}}{67,7 \text{ mm}} \cdot 100 = 55,8\%$$

100% - E_a = perdas por percolação profunda e por escoamento superficial = **44,2 %**

$$P_p = \frac{y_m - LL}{y_a} \cdot 100 = \frac{40,76 \text{ mm} - 37,8 \text{ mm}}{67,7 \text{ mm}} \cdot 100$$

$$P_p = 4,4 \% < 12 \% \text{ OK}$$

$$P_e = \frac{y_a - y_m}{y_a} \cdot 100 = \frac{67,7 \text{ mm} - 40,76 \text{ mm}}{67,7 \text{ mm}} \cdot 100$$

$$P_e = 39,8 \% > 25 \% \text{ alto}$$